

УДК 535.421+536.582.6+536.516.1+536.331

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ИМПЛАНТИРОВАННОМ КРЕМНИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ СВЕТОВОМ ОБЛУЧЕНИИ

*Б.Ф. Фаррахов, М.Ф. Галяутдинов, Я.В. Фаттахов, М.В. Захаров*

### Аннотация

В работе предложен и реализован бесконтактный метод исследования динамики нагрева и твердофазной рекристаллизации имплантированных полупроводников непосредственно во время проведения импульсного светового отжига. Данная методика, основанная на регистрации оптических дифракционных сигналов от специальных периодических структур, позволяет с высоким временным разрешением определять такие характеристики, как температура и длительность процесса твердофазной рекристаллизации, время начала плавления ионно-легированного слоя полупроводника.

**Ключевые слова:** кремний, ионная имплантация, импульсный световой отжиг, рекристаллизация, дифракция Фраунгофера, тепловое расширение твердых тел.

---

### Введение

Для целенаправленного управления режимами импульсного светового отжига (ИСО) и получения информации о структурных и фазовых изменениях в имплантированных полупроводниках желательно использовать бесконтактные методы диагностики вещества, в том числе и контроля температуры. С этой целью нами для исследования процессов рекристаллизации и локального анизотропного плавления поверхности имплантированного кремния была разработана оригинальная методика, основанная на регистрации динамики дифракции Фраунгофера от специальных периодических структур, предварительно сформированных на поверхности изучаемых образцов [1]. При этом регистрировались изменения дифракционной эффективности (ДЭ) решетки, вызванные структурно-фазовыми превращениями в процессе ИСО.

Что касается контроля нагрева вещества в процессе ИСО, то использование таких методов измерения температуры, как пирометрия [2], рамановское рассеяние света [3], дифракция электронов на кристаллической решетке [4], в данном случае ограничивается их применимостью только к объектам с кристаллической структурой или затруднениями выделения полезного сигнала.

В работе [5] авторы применили метод дифракции света для измерения температуры твердого тела в режиме медленного стационарного нагрева. В качестве сенсора использовалась плоская периодическая решетка, сформированная на карбиде кремния. Такой датчик позволил им измерить температуру до 370 °С.

С целью развития дифракционного метода измерения температуры применительно к исследованию динамики нагрева твердого тела при импульсных световых обработках нами были проведены экспериментальные исследования на образцах кремния в широком диапазоне температур, включая температуру плавления 1412 °С.

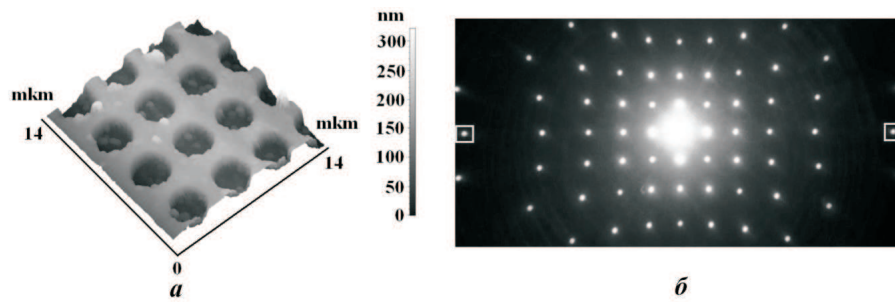


Рис. 1. Топография фазовой решетки образца, измеренная атомно-силовым микроскопом (а) и дифракционная картина, получаемая при зондировании данной решетки He-Ne-лазером (б)

### 1. Методика эксперимента

Для изучения нагрева образцов в процессе ИСО регистрировалась динамика изменения дифракционной картины Фраунгофера от фазовой решетки, вызванная изменением периода дифракционной решетки за счет теплового расширения образца [6]. С этой целью отслеживалось угловое перераспределение пятого дифракционного максимума. По величине угла отклонения дифракционного пучка можно определить текущую температуру образца.

Зависимость изменения угла дифракции  $\Delta\varphi$  от изменения температуры  $\Delta T$  выражается формулой [6, 7]:

$$\Delta\varphi = \frac{k\lambda\alpha\Delta T}{\sqrt{d^2 - k^2\lambda^2}}, \quad (1)$$

где  $k$  – порядок дифракционного максимума,  $\lambda$  – длина волны,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения,  $\Delta T$  – изменение температуры,  $d$  – период решетки.

Использование дифракционной решетки с малым периодом увеличивает чувствительность измерения температуры, как и регистрация высокого порядка дифракции. В связи с этим нами была изготовлена фазовая дифракционная решетка с периодом 4 мкм (рис. 1 а, б).

На рис. 2 представлена блок-схема установки. Во время ИСО на образец 3 с измерительной дифракционной решеткой, находящийся в реакционной камере 4 установки УОЛ.П-1 1, подается пучок излучения зондирующего лазера ЛГН-111 6. Через симметрично расположенные отверстия пучки дифракционных максимумов пятого порядка попадают на отклоняющие зеркала 5' и в исходном состоянии совмещаются на экране 10. Такая схема совмещения компенсирует влияние вибрации образца на отклонение дифрагированных пучков. Экран представляет собой матированную с одной стороны стеклянную пластину с миллиметровой шкалой. Длина пути дифрагированного от образца пучка до экрана  $L$  в схеме составляет 2315 мм.

С целью отработки методики измерения температуры нагрева длительность светового импульса варьировалась в диапазоне от 120 мс до 5 с, а плотность мощности излучения ИСО – от 50 до 1000 Вт/см<sup>2</sup>.

После включения мощного импульса некогерентного света по мере нагрева исследуемого образца на экране происходит отклонение дифракционных пучков в противоположные стороны на величину  $2\Delta x = 2L\Delta\varphi$ , значение которой определяется температурой нагрева, а скорость их движения характеризует динамику

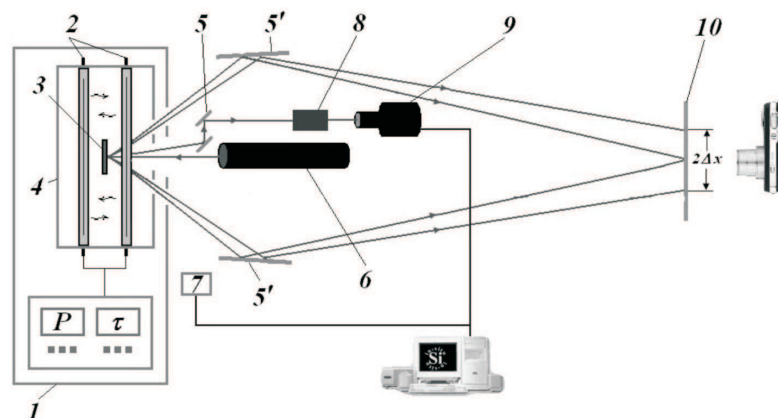


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – УОЛ.П-1; 2 – ксеноновые лампы-вспышки; 3 – образец; 4 – реакционная камера; 5, 5' – отражательные зеркала; 6 – He-Ne-лазер ЛГН-111 (0.6328 мкм); 7 – фотодиод ФД-7; 8 – светофильтры; 9 – ФЭУ-84; 10 – экран из матового стекла

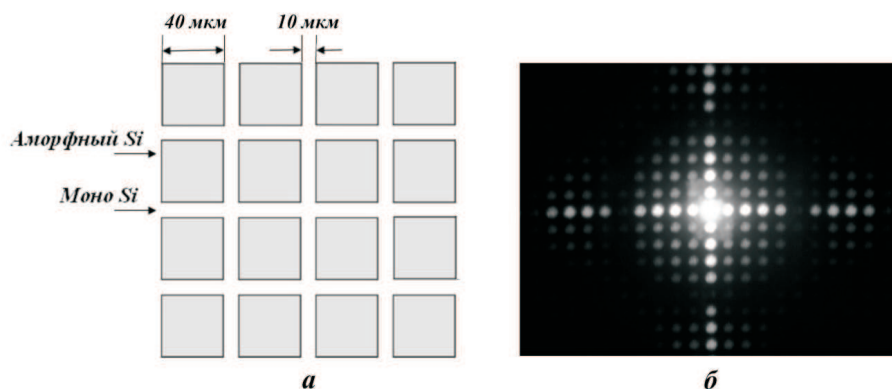


Рис. 3. Структура амплитудной дифракционной решетки на поверхности образца (а) и дифракционная картина, полученная при зондировании данной решетки He-Ne-лазером (0.6328 мкм) (б)

роста или спада температуры. Динамика всего процесса регистрировалась нами цифровой камерой в режиме съемки до 300 кадров в секунду.

Для исследования твердофазной рекристаллизации на поверхности образцов ионной имплантацией с применением фотолитографии формировалась периодическая структура, состоящая из ячеек аморфного кремния, размерами  $40 \times 40$  мкм, разделенных монокристаллическим кремнием шириной 10 мкм (рис. 3, а). Данная структура из-за различия в коэффициентах отражения между аморфным ( $R_a = 0.4$ ) и монокристаллическим ( $R_{cr} = 0.34$ ) [6] кремнием является амплитудной дифракционной решеткой с периодом 50 мкм для зондирующего луча He-Ne-лазера ( $\lambda = 0.6328$  мкм). В качестве образцов использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-1 с кристаллографической ориентацией поверхности (100) толщиной 400 мкм. Имплантация проводилась ионами  $P^+$  с энергией 40 кэВ и дозами от  $6.3 \cdot 10^{14}$  до  $1.9 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$ .

Дифракционная эффективность (ДЭ) данной амплитудной решетки зависит от разницы в коэффициентах отражения аморфных и монокристаллических фрагментов. Структурные и фазовые превращения в процессе ИСО приводят к заметному изменению коэффициентов отражения кремния при переходе его из аморфного состояния в кристаллическое или жидкое состояние ( $R_l = 0.72$ ) [9]. Поэтому по мере рекристаллизации аморфной области или плавления заметно изменяется и ДЭ решетки. Таким образом, регистрация ДЭ данной решетки во время отжига позволяет отслеживать процесс рекристаллизации и плавления имплантированного аморфного слоя полупроводника. С этой целью регистрировалось изменение интенсивности первого дифракционного максимума.

Импульсное облучение образцов проводилось на установке УОЛ.П-1 1 излучением трех ксеноновых ламп-вспышек 2, работающих в стробоскопическом режиме (рис. 2).

Пучок дифракционного максимума первого порядка с помощью отклоняющих зеркал 5 направляется на ФЭУ-84 9 через систему линз и светофильтров 8. Сигнал с ФЭУ и фотодиода 7 преобразуется АЦП и записывается в компьютер. Фотодиодом ФД-7 регистрируется форма светового импульса ксеноновых ламп-вспышек. Зондирование образцов производилось He-Ne-лазером ЛГН-111.

Формирование на одном образце амплитудной и фазовой решеток позволяет исследовать структурно-фазовые переходы в имплантированном полупроводнике одновременно с измерением их температуры. Фазовая решетка является датчиком температуры образца, а по амплитудной решетке отслеживаются структурно-фазовые переходы.

На поверхности пластины монокристаллического кремния методом ионной имплантации и фотолитографии формировалась пара смежных дифракционных решеток: амплитудная и фазовая решетки с периодами 50 и 4 мкм соответственно.

Во время ИСО луч лазера ЛГН-111 6 (рис. 2) падает по нормали к поверхности образца 3 таким образом, что пучок охватывает обе дифракционные решетки.

По изменению интенсивности первого дифракционного максимума от амплитудной решетки можно определить моменты завершения процесса твердофазной рекристаллизации и начала плавления поверхности образца. Смещение  $2\Delta x$  на экране 10 пятых дифракционных максимумов от фазовой решетки показывает текущую температуру образца.

## 2. Результаты и их обсуждение

Для определения температуры нагрева были теоретически рассчитаны зависимости углового изменения, соответственно и смещения на экране, дифракционных максимумов  $2\Delta\varphi(2\Delta x)$  от температуры  $T$ , °С, по формуле (1). В расчетах была использована зависимость коэффициента теплового расширения от температуры  $\alpha(T)$  из работы [9]. Начальная температура образца равнялась 90 °С из-за нагрева образца излучением ламп-вспышек, работающих в дежурном режиме.

Анализ сдвига дифракционных максимумов от фазовой решетки на экране позволил оценить динамику изменения температуры относительно временных параметров импульса света.

С помощью компьютерной обработки сигналов с ФЭУ были определены моменты завершения твердофазной рекристаллизации и время начала локального плавления поверхности имплантированного полупроводника. Сигнал изменения дифракционной эффективности амплитудной решетки и график динамики нагрева во время световой импульсной обработки плотностью мощности 200 Вт/см<sup>2</sup> и длительностью 680 мс представлены на рис. 4, 5.

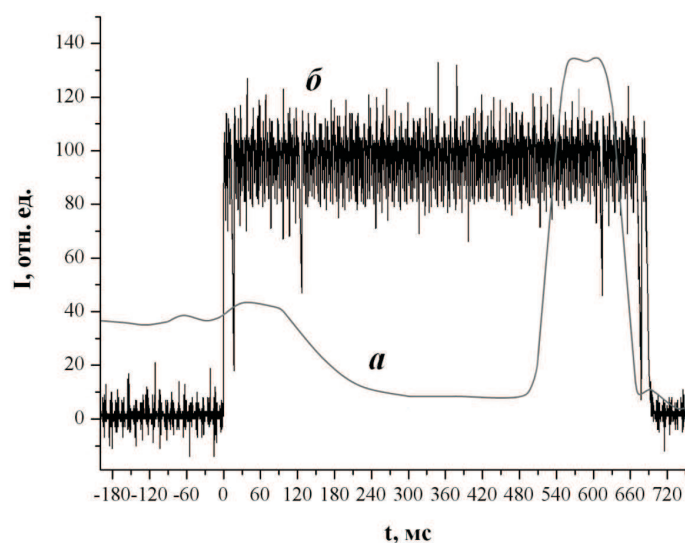


Рис. 4. Сигнал изменения интенсивности первого максимума дифракции от амплитудной решетки (*a*) во время световой импульсной обработки образца импульсом света длительностью 680 мс; форма светового импульса (*б*)

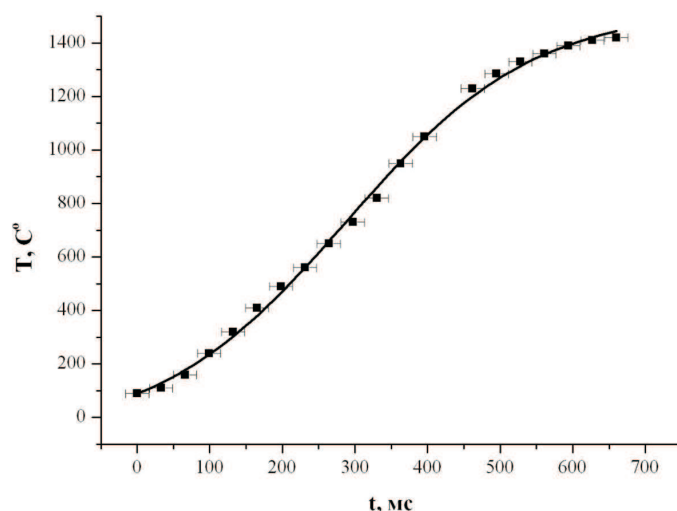


Рис. 5. Зависимость температуры образца от времени при импульсном световом нагреве. Длительность светового импульса составляет 680 мс

Во временном интервале от 80 до 300 мс интенсивность дифракционной картины падает до полного исчезновения. Это свидетельствует о завершении процесса твердофазной рекристаллизации аморфных участков решетки. К этому моменту образец нагрелся до температуры 700 °С. Повторное появление дифракционного сигнала в момент времени 490 мс вызвано началом плавления рекристаллизованных имплантированных областей поверхности образца, температура плавления которых ( $T \approx 1300$  °С) [10] ниже плавления исходных монокристаллических участков ( $T = 1412$  °С). При этом на поверхности образуется периодическая структура из локальных областей плавления [1]. Разница в коэффициентах

отражения, теперь уже между кристаллическим и жидким кремнием, а также образование микрорельефа приводят к повторному появлению дифракционной картины. С дальнейшим ростом температуры образца локальные области плавления быстро сливаются и дифракционный сигнал исчезает при 680 мс.

Разброс измерения температуры в данных экспериментах в основном обусловлен частотой кадров съемки цифровой камеры.

### 3. Выводы

На основе дифракции Фраунгофера реализована на практике методика лазерной диагностики с целью комплексного исследования динамики нагрева, температуры рекристаллизации и образования локальных областей плавления на имплантированных полупроводниках при импульсных световых воздействиях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная методика позволяет регистрировать температуру образца непосредственно во время его импульсного нагрева, кинетику рекристаллизации и плавления в ионно-имплантированных полупроводниках.

Данная методика измерения температуры является весьма полезной при изучении импульсных воздействий на твердое тело для широкого диапазона длительностей не только в случае его нагрева, но и в случае охлаждения, например при лазерном охлаждении твердого тела [11]. Кроме того, эта методика позволяет измерять коэффициент линейного расширения на образцах малого размера и может быть весьма полезной в дилатометрии.

Разработанная нами методика может иметь прикладное значение. Она позволит создать технологию термической обработки имплантированных полупроводников с контролем и по температуре, и по факту завершения требуемого процесса рекристаллизации, не влияя на параметры полупроводника.

### Summary

*B.F. Farrakhov, M.F. Galyautdinov, Ya.V. Fattakhov, M.V. Zakharov.* Investigation of Heating and Recrystallization of Implanted Silicon under Pulse Light Irradiation.

A noncontact method was suggested and applied to investigate the heating dynamics and solid-phase recrystallization of implanted semiconductors during pulsed light annealing. This method is based on the recording of optical diffraction signals from special periodic structures prepared in advance. The method makes it possible to record the temperature and duration of solid-phase recrystallization with high time resolution, as well as to determine the incipient melting time of the ion-implanted semiconductor layer.

**Key words:** silicon, ion implantation, pulsed light annealing, recrystallization, Fraunhofer diffraction, thermal expansion of solids.

### Литература

1. *Фаттахов Я.В., Галляутдинов М.В., Львова Т.Н., Хайбуллин И.Б.* Формирование периодических дифракционных структур на поверхности полупроводников для исследования динамики фотоиндуцированных фазовых переходов // *Оптика и спектр.* – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 182–156.
2. *Рывкин С.М., Салманов В.М., Ярошецкий И.Д.* Тепловое излучение Si под действием лазерного пучка // *Физ. тверд. тела.* – 1968. – Т. 10, № 4. – С. 1022–1024.
3. *Lo H.W., Cotraan A.* Raman measurements of temperature during CW laser heating of silicon // *J. Appl. Phys.* – 1980. – V. 51, No 3. – P. 1565–1568.

4. *Галляутдинов М.Ф., Саинов Н.А., Хайбуллин И.Б., Штырков Е.И.* Способ определения температуры кристаллов при импульсном нагреве // Бюл. изобр. – 1983. – А.с. № 48. – С. 307.
5. *DesAutels G.L., Powers P., Brewer C., Walker M., Burky M., Anderson G.* Optical temperature sensor and thermal expansion measurement using a femtosecond micromachined grating in 6H-SiC // Appl. Opt. – 2008. – V. 47, No 21. – P. 3773–3777.
6. *Магунов А.Н.* Лазерная термометрия твердых тел. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
7. *Галляутдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.* Динамическая термометрия твердого тела методом оптической дифракции при импульсном воздействии // Оптика и спектр. – 2009. – Т. 107, № 4. – С. 708–712.
8. *Шварев К.М., Баум Б.А., Гельд П.В.* Оптические свойства жидкого кремния // Физ. тверд. тела. – 1974. – Т. 16, № 11. – С. 3246–3248.
9. *Okada Y., Tokumaru Y.* Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K // J. Appl. Phys. – 1984. – V. 56, No 2. – P. 314–320.
10. *Поут М., Фоти Г., Дджебсон Д.К.* Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. – М.: Машиностроение, – 1987. – 424 с.
11. *Самарцев В.В., Петрушкин С.В.* Лазерное охлаждение твердых тел. – М.: Физматлит, 2005. – 224 с.

Поступила в редакцию  
11.12.09

---

**Фаррахов Булат Фасимович** – аспирант отдела методов медицинской физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [farrakhov@kfti.knc.ru](mailto:farrakhov@kfti.knc.ru)

**Галляутдинов Мансур Фаляхутдинович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [utdin@mail.ru](mailto:utdin@mail.ru)

**Фаттахов Яхъя Валиевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом методов медицинской физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [fattakhov@kfti.knc.ru](mailto:fattakhov@kfti.knc.ru)

**Захаров Максим Викторович** – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [zmv@kfti.knc.ru](mailto:zmv@kfti.knc.ru)